

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12205

研究課題名（和文）Cs-137による複雑系土砂粒子群動態解析：吸着汚染物質の滞留期間の予測に向けて

研究課題名（英文）Complex Sediment Particle Group Dynamics Analysis by s-137: Toward Prediction of Residence Time of Adsorbed Contaminants

研究代表者

谷口 圭輔 (Taniguchi, Keisuke)

津山工業高等専門学校・総合理工学科・准教授

研究者番号：80774794

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：河川で輸送される碎屑物が広い粒度分布を持つ場合、大粒子の間に細粒画分が取り込まれることがある。本研究では、水路実験による細粒成分の取り込み過程の観測、実河川での出水時の地形変化を調べる写真測量、土砂試料の粒度分布とCs-137濃度の測定を実施した。水路実験では、細粒が粗粒画分の下に保持されたり、巨礫の陰の局所的な渦で両者が混合されたりする事例を観測した。実河川では、出水前後の地形変化を写真測量で捉え、土砂試料を取得した。粒度分布とCs-137濃度の変化から、今後粒径画分ごとの混合比を粒度分布から決定できれば、Cs-137をトレーサーとして、細粒粒子の入替わりを検出できる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

川の流れの中に土砂が堆積し、洲を作ることがある。普通は、大きな粒子ほど堆積しやすいが、大きな粒子と細かい粒子が混ざって運ばれている河川では、細かい粒子が取り込まれやすくなる場合がある。この研究では、セシウムの細かい粒子に吸着されやすい質を活かして、実河川の砂礫洲で細かい土砂の流失や再堆積の量を計算できないかと考えた。大雨の前後での調査の結果、新しくできた起伏の土砂と元からの土砂、両方の試料を比較することができた。原発事故由来のセシウム137を、その細かい粒子がもとからあったものが、新しく取り込まれたものかを判断する道具（環境トレーサー）として使うことができる可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：When riverine sediment has a wide grain size distribution, the fine-grained fraction may be captured in the spaces between the large particles. We observed the process of capturing the fine-grained fraction through flume experiments, conducted photogrammetric surveys to determine topographic changes during flooding in a real river, and measured the grain size distribution and Cs-137 concentration of sediment samples. In the channel experiment, we observed cases where fine grains were retained under the coarse-grain fraction and mixed with the coarse-grain fraction in local eddies near large gravels. In a river, topographic changes before and after the flooding were measured by photogrammetry, and sediment samples were obtained. The changes in grain size distribution and Cs-137 concentration suggested that if the mixing ratio of each grain size fraction could be determined from the distribution, it would be possible to detect the replacement of fine particles using Cs-137 as a tracer.

研究分野：地形学

キーワード：河川 放射性セシウム 水路実験 写真測量 混合粒径 砂礫洲

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所(以下、1F)の事故で陸域に沈着した放射性核種のうち、Cs-137は1Fから80km圏内を中心に現在も広く分布している。これまでの研究で、河川を介して海へと流下する放射性セシウムの90%以上はシルトや泥などの微小土砂粒子に吸着された「懸濁態」と呼ばれる形態で流下していること、その放射能濃度は初期に比べ1桁以上低下していることなどが分かっており、健康影響への不安はかなり払拭されてきたが、初期沈着量の0.1-0.01%のオーダーで流出は現在も続いている(Taniguchi et al., 2019, EST, 53, 12339-12347; Onda et al., 2020, Nat. Rev. Earth Environ. doi:10.1038/s43017-020-0099-x)。そのため、流路内に存在する砂礫洲での粗大粒子間隙における微小粒子の貯留に関する理解は引き続き重要である。

一方で、Cs-137の微小粒子に吸着されるという特徴は、物質輸送の現象を理解するためのトレーサーとしての利用に適している。他の核種や化学物質と組み合わせることで、陸域における水や土砂などの物質循環に関して、その量や滞留時間等を推定する先行研究も存在する(e.g. Smith et al., 2014, Earth Surf. Process. Landforms, 39, 1944-1959)。

申請者はこれまで、木津川(京都府)の砂礫洲での現地観測(谷口, 2011, 平成22年度深田研究助成; 増田ら, 2016, 地形, 37(3), 345-361; 坂本ら, 2016, 地球科学, 70, 65-81。)や、造波水路を用いた実験(谷口, 2011, 地形, 32(2), 152-158)を通じて、流れや波による土砂粒径分別の発生と、それによって形成される地形内部堆積構造について研究を行ってきた。2018年度からは、科研費研究課題「未除染森林土壌の再堆積に影響する砂礫洲による泥質の捕捉・排出能: 河川地形学的検討」(以下、前課題)において、福島県東部を流れる新田川の下流に位置する大原水辺公園周辺の砂礫洲において、観測を実施した。研究期間中に令和元年台風19号による大規模出水があり(谷口ら, 2020, JpGU2020 講演要旨)周期的な礫の渋滞構造(ジャム)や、礫の間隙への細粒粒子の堆積などの特徴が観察された(図1)。

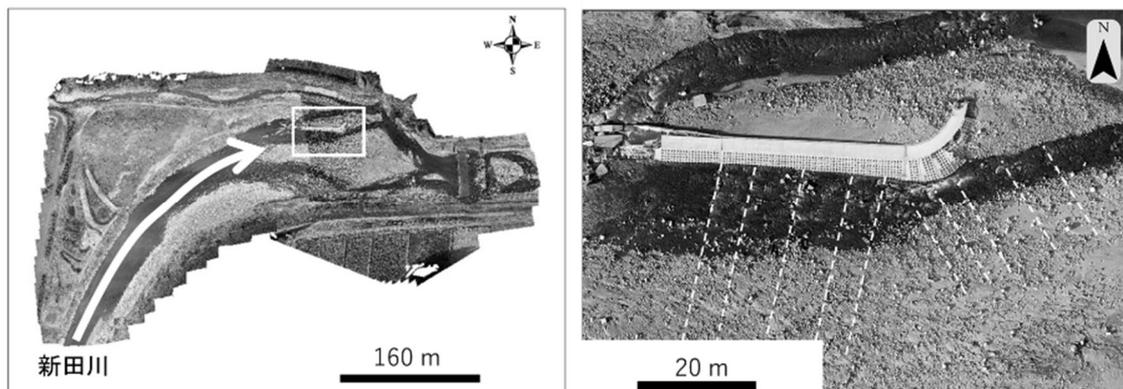


図1 令和元年台風19号により発達した砂礫洲上の堆積構造

単一粒径の粒子群の場合、輸送・堆積・再移動等の挙動は単純だが、混合粒径の条件下では、粒子サイズに依存する異なる挙動を示すほか、粒径画分間の相互作用により複雑な挙動となる。このような「複雑系土砂粒子群」で起きる現象の理解は不足しており、汎用的な予測モデルも存在しない。出水時の砂礫洲で起こる粒径分別について、その発達過程と形成条件を明らかにすることで、砂礫洲の形成と発達に関する地形学的な知見が得られるだけでなく、Csのように粘土鉱物に吸着されて移動する汚染物質が、どのような場所に滞留しやすいのかを予測することにも応用できると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、砂礫洲において、微小粒径画分が、複雑系土砂粒子群内での相互作用の効果により堆積し長期間蓄積されやすい条件と、蓄積された微小粒径画分が再び移動するのに必要な出水の規模を明らかにすることである。滞留域ではない河道は、単一粒径の粒子群であれば微小粒子の堆積が起こらない場所であるが、実際には砂礫洲・砂礫堆上に微小粒子の堆積は起こっている。粗大粒子の間隙が、微小粒子とそれに吸着された汚染物質の貯留庫となりうるという事実について、詳細な検討を行うことは非常に重要である。

本研究の特徴は、砂礫洲における微小粒径画分の堆積・再移動に注目して、どのような条件下で堆積しやすいのかについて、現地観測と水路実験を組み合わせる点にある。現地観測では自由に変更できない河道傾斜・粗粒成分と微小粒径画分のサイズ比・流況などを、水路実験では変更することができる。また、現地観測では福島第一原子力発電所事故由来のCs-137濃度をトレーサーとして用いることで、細粒成分のトラップされた時期を特定し、滞留時間を推定

することを試みている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 現地観測

前課題に観測対象とした、福島県東部を流れる新田川の下流域に位置する公園周辺の砂礫洲を観測対象とする。2019年東日本台風による水害後の復旧工事が2020～2021年に実施された結果、重機により砂礫洲の表面形状が平滑化され、粒度分布も非常に幅広い不自然な状況となった。その後の出水時の冠水による地形起伏・粒度分布の変化が追いやすい初期条件が整えられたといえる。

河川公園には、実際の浸水域を把握するためのインターバルカメラが2021～2023年11月にかけて設置され、計6台のカメラにより10分おきの写真を取得した。また、2022年9月と、2023年8月、同年11月の3回にわたり、ドローン(DJI社製 Phantom4 RTK)による写真測量を実施した。あらかじめ計画した飛行経路によりドローンを飛行させて得た写真を Agisoft Metashape を用いて処理し、およそ2cmメッシュのDSMを作成し、地表高変化を分析した。写真測量実施日と2023年1月の4回、河川公園と砂礫洲表面で土砂試料の採取を実施した。空間代表性確保のため、50cm×50cm程度の正方形の区画から、採土器(大起理化工業製 DIK-1630)で容積50mLに含まれる表層の土砂を採取し、乾燥後、2mmのフルイで篩分し、2mm以下の画分について粒度分布とCs-137放射能濃度の測定を実施した。

当初計画では、2021年度中、工事終了直後からドローンによる写真測量を年2回実施する予定であったが、コロナウイルス禍による県外出張の自粛の影響で、初回の測量が2022年夏にずれ込んでしまった。

#### (2) 水路実験

2021年度に、混合粒径からなる砂山でバルハン地形を作ることによる、堆積物から細粒成分のみが流出状況を再現する実験(以下、「流出実験」)を、2022-2023年度に、細粒成分が大量に浮遊する流れの中で粗粒砂が掃流様式で移動する場合の細粒成分の堆積物中への取り込みについての実験(以下、取り込み実験)を実施した。

流出実験は、筑波大学に設置の20cm幅水路を用い、粗粒成分(直径1-2mmの粗粒砂)と細粒成分(豊浦標準砂)を重量比4:1で混合した初期重量150gの円錐形の砂山を初期地形として、約17 m<sup>3</sup>/sで水流を100秒程度作用させて、形成されたベッドフォーム別に土砂を回収し、それぞれに含まれる粗粒成分と細粒成分の重量比を調べた。

取り込み実験は、津山高専で幅7cmの小型水路を制作し、砂礫洲表面に存在する巨礫による起伏を再現するために高さ1cm程度の障害物を一定間隔で配置した、黒色を呈するいわき砂3号を粗粒成分、特8号砂を細粒成分とし、細粒成分を常に浮遊させた状態で循環させた水路部に、上流端から粗粒成分を投入することにより、粗粒成分が掃流、細粒成分が浮遊という状態とし、土砂が障害物の間隙を埋めるまで土砂を堆積させた。堆積過程の観察と堆積中の粗粒砂と細粒砂の重量比の測定を行った。

#### (3) 数値実験

iRic softwareに含まれるNays 2D Floodを用いて、2019年東日本台風の際の出水を再現し、メッシュごとの平均流速の違いを調べた。地形データとして、2022年9月に取得したDSMを用い、流量データとしては、観測地点から数km下流にある原町地点における流量データを2019年に実測された浸水範囲と照合して調整した値を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 現地観測

インターバルカメラの画像より、工事後最初の写真測量から最後の写真測量の間で、観測対象の砂礫洲が完全に冠水する規模の出水は、2023年9月8-9日の1回のみであった。そのため、2023年8月と2023年11月の空撮画像の間の地形変化は、この1回の出水によるものをピンポイントでとらえているといえる。

2023年11月のオルソ画像には、8月になかった堆積構造が複数観測された。冠水時の流向に平行に帯状に伸びる「サンドリボン」、表層を掃流により移動した砕屑物が、下流に傾斜したすべり斜面を作る「マイクロデルタ」様地形などが観測されたほか、巨礫の間の堆積物の流失が見られたり、新たな堆積物により砂礫洲の範囲が拡大したりしていることが観測できた。

上記の新規堆積物の粒度分布を、出水以前の堆積物や、新規堆積物以外の場所から採取した土砂と比較したところ、出水以前に含まれていた数100～数10ミクロンの細粒成分が流失し、1mm前後の粗粒成分が新規堆積物を構成していることが分かった。また、両者のCs-137濃度についても、新規堆積物の濃度は出水前及び新規堆積物以外の試料の濃度よりも有意に低くなっていた。このことは、出水による土砂の再移動の際、粗粒成分は新規堆積物を構成しつつ砂礫洲上に残り、細粒成分が下流へ流失した可能性を示唆する。

今後、細粒成分が増加する現象が起きた場合に、粒径画分ごとの存在比を粒度分布から抽出し、河川浮遊砂に含まれるCs-137の濃度との比較を行うことで、堆積した細粒成分がいつ頃河川を流下してきたのかを知ることができると考えている。

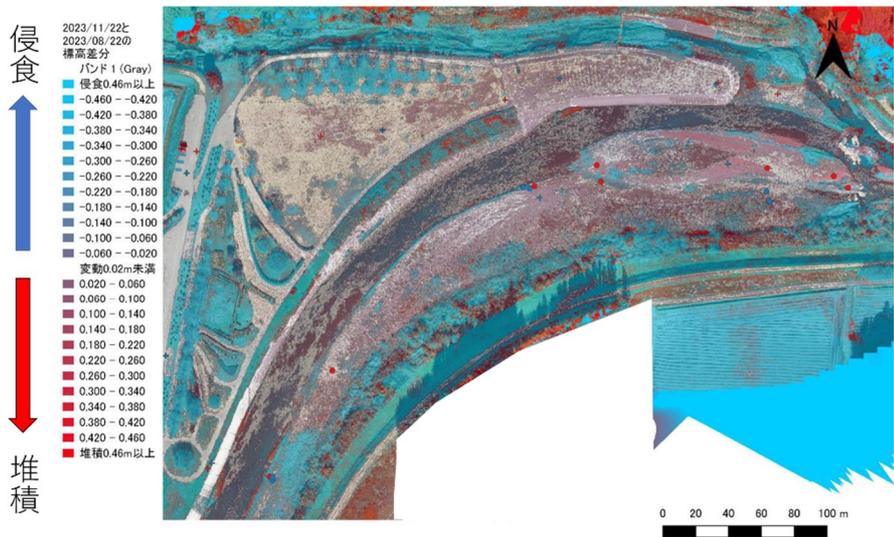


図2 河川公園と対岸の砂礫洲における2023年8月と11月のDSMの間の標高差。赤い部分が侵食、青い部分が堆積を示す[1]。

(2) 水路実験

流出実験の結果を下図に示す。細粒成分の多くは一旦浮遊し、初期位置から50cm以上離れた場所から1mくらいの区間に薄く広がり、パッチ状の地形を作った(図中右側。)一方、粗粒成分の一部と細粒成分は、それぞれバルハン様の平面形態を持つリップルとなったが、粗粒砂からなるもののほうが、細粒成分からなる者よりも速く下流側へ移動した。この結果は、単一粒子の限界掃流力の大小と逆の結果となっており、メカニズムは不明ながら、混合粒径特有の効果を表していると思われる。

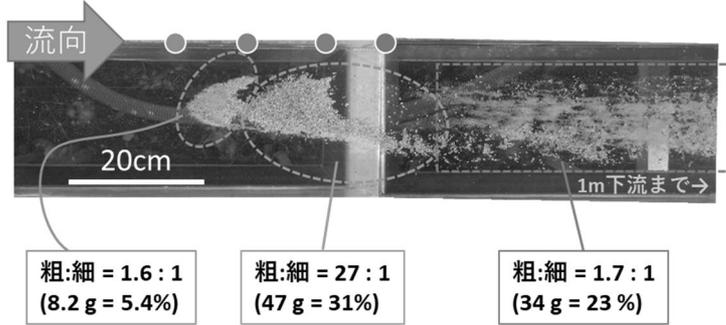


図3 流出実験の結果。水路を直上からみた図。最も左(下流)側にある三日月形の部分が細粒成分を中心としたバルハン様リップル、中央の部分が粗粒成分によるバルハン様リップル、最も右側の四角部分が細粒成分を中心としたパッチ状地形である。

一方、取り込み実験では、実験の経過の観察から、粗大粒子が運ばれてくる前に微細粒子が堆積し後からやってきた粗大粒子が蓋をする過程と、両者が巨礫近傍の渦によりよくまじりあって堆積する過程の2つが認められた。前者は、堰の間隔に寄らず全条件で起きていたが、後者は特定の堰の間隔の時にのみ起こることが分かった(図4)。

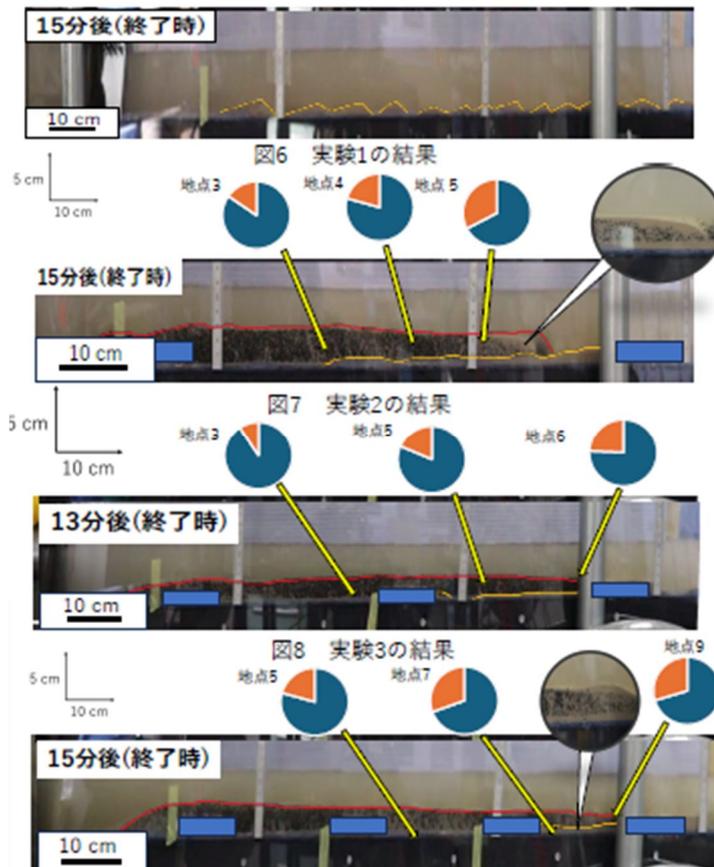


図4 取り込み実験の結果。実験1は粗粒分の投入を行わなかった場合の例で、底面全体に横列リップルが形成された。実験2,3,4の写真中の青い長方形は流れて移動しない巨礫による起伏を模した障害物の位置を示す。黄線より下には細粒成分が先に堆積してトラップされているほか、実験2と4で吹き出しで拡大されている部分では、2種類の粒子が混合される現象が起きていることが分かる[2]。

### (3) 数値実験

2022年9月のDSMを用いて、2019年東日本台風と同様の出水が観測地点を襲った場合の浸水範囲・最大流速・最大水深を、iRic Nays 2D Floodを用いて計算した。その結果、河川公園の護岸が崩壊した部分で最も流速が高くなることが確認できた。また、砂礫洲表面においても、最大水深3~4m、平均流速2m/sを超える時間が長く続き、巨礫を含む堆積物の再移動が起きたであろうことが示唆された。

2023年9月の出水は、表面の粗粒砂以下の画分が良く動き、巨礫は動かないという条件であったと考えられる。現在、この時期の河川流量のデータは未取得であるが、これが手に入れば、中程度の出水における砂礫洲上の流速や底面せん断応力を推定することができる。

### (4) まとめ

一連の研究より、幅広い粒径の土砂が一度に移動し、堆積する砂礫洲の上で起こりうる混合粒径特有の現象について、新たな知見を得ることができた。移動する土砂の一部が浮遊により下流へと流失し、掃流移動した粗粒成分が砂礫洲上で新たなベッドフォームができる現象は、現地観測と流失実験で観察することができた。逆に、細粒成分がトラップされる現象は、取り込み実験で起こりうる現象であることが示唆されたが、実河川でのデータは取得できなかった。

シルト・クレイなどの細かい粒子に選択的に吸着されるCs-137は、砂礫洲の細粒成分の堆積時期を知るトレーサーとして、使用可能である可能性が示唆された。今後、細粒成分が捕捉される場でのサンプリングが行えれば、この方法の実用性をより詳しく検証できると考えられる。

以上

### 引用文献

- [1] 「UAVによる出水後の砂礫洲の地形変化の観測」、谷口圭輔・津田惇史・林隼大・遠藤徳孝, 日本堆積学会2024年熊本大会, ポスターP2.
- [2] 「砂礫洲上における混合粒径砂の堆積過程に関する水路実験」、赤松諒・佐藤遥斗・大下純平・金山蒼真・谷口圭輔, 日本堆積学会2024年熊本大会, ポスターP1.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤松諒・佐藤遥斗・大下純平・金山蒼真・谷口圭輔
2. 発表標題 砂礫洲上における混合粒径砂の堆積過程に関する水路実験
3. 学会等名 日本堆積学会2024年熊本大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷口圭輔・津田惇史・林隼大・遠藤徳孝
2. 発表標題 出水イベント時に浸水した砂礫洲表面の侵食・堆積
3. 学会等名 JPGU2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷口圭輔・津田惇史・林隼大・遠藤徳孝
2. 発表標題 UAVによる出水後の砂礫洲の地形変化の観測
3. 学会等名 日本堆積学会2024年熊本大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 谷口圭輔
2. 発表標題 高専における水路制作実習
3. 学会等名 日本堆積学会 2023 年新潟大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 谷口圭輔, 恩田裕一, 藤田一輝, 竹内幸生, 勝野和美, 新井宏受, 那須康輝
2. 発表標題 福島第一原発から80km圏内の30の河川観測点における137Cs移行の10年間にわたるモニタリングについて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口圭輔, 那須康輝, 新井宏受, 竹内幸生, 勝野和美, 藤田一輝, 大西康夫
2. 発表標題 福島県内の河川における放射性セシウム流出に関する1次元有限要素法シミュレーション
3. 学会等名 日本地形学連合2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 口圭輔, 那須康輝, 新井宏受, 竹内幸生, 勝野和美, 藤田一輝, 大西康夫
2. 発表標題 福島の河川における出水時の放射性セシウム動態の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠藤 徳孝 (Endo Noritaka) (60314358)	金沢大学・地球社会基盤学系・准教授  (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------